SISTEMA INTERFEROMÉTRICO PARA LA CALIBRACIÓN DE REGLAS GRADUADAS MEDIANTE UN SISTEMA DE VISIÓN

Carlos Galván[1], Héctor González[2]
Centro Nacional de Metrología
Apdo. Postal 1-100 Centro, C. P. 76000, Querétaro, QRO., México.
Tel: +52 442 2110500 Fax +52 442 2110568 cgalvan@cenam.mx[1] hgonzale@cenam.mx[2]

Resumen: En el CENAM, se ha diseñado un sistema automático para la calibración de reglas graduadas de hasta 3m de longitud. Este sistema incorpora un sistema interferométrico para seguir la posición de un carro que soporta una cámara CCD. Las imágenes son procesadas usando un novedoso y robusto algoritmo. El sistema consiste de una bancada rígida con guías de rozamientos lineales para desplazar el carro. Aun cuando este viaja sobre guías no cinemáticas, el microscopio y la cámara CCD están montados sobre una base que a su vez esta soportada cinemáticamente. La incertidumbre esperada es de alrededor de 6 micrómetros en reglas con trazos de buena calidad. El sistema actualmente se encuentra en su fase de caracterización.

1. INTRODUCCIÓN

En metrología dimensional existen diferentes calibraciones que requieren por una parte experiencia y por otra, mucho tiempo para su ejecución, por ejemplo la calibración de bloques patrón por interferometría requiere ambas, a pesar de esto el proceso ha logrado ser automatizado por varios laboratorios nacionales.

La calibración de reglas graduadas ofrecida por laboratorios secundarios y la industria en México no esta totalmente satisfecha pues la incertidumbre resultante no es lo suficientemente pequeña para algunos procesos ya que en algunos casos la incertidumbre reportada es igual o más grande que las desviaciones encontradas.

Por otro lado, el servicio ofrecido por los laboratorios de CENAM consume mucho tiempo de metrólogos especializados así como equipo que no esta diseñado para este propósito. Por ejemplo para la calibración de una regla graduada de 3m en solo 22 de sus trazos consume, en promedio, tres días, e involucra el uso de una CMM con una cámara CCD. A esto se debe agregar que la demanda de este servicio es continuo durante todo el año.

Por lo anterior, la división de metrología dimensional del CENAM tomó la decisión de desarrollar una sistema para la calibración de reglas que cumpliera con los siguientes requerimientos:

- Automatizado, en el que solo fuera necesario realizar la alineación de la regla, así como la sintonización del sistema para realizar la medición.
- Posibilidad de elegir las líneas sobre las cuales se requiera hacer la calibración para satisfacer la demanda del cliente.
- Alcance de medición de hasta 3m.
- Evitar la confusión que pueda causar la presencia de alguna ralladura o daño sobre la regla con los trazos de la misma, minimizando el efecto sobre la medición.
- Mejorar la incertidumbre del proceso de calibración actual.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DESARROLLADO

Se han estudiado diferentes tipos de instrumentos usados en la calibración de reglas, y el mas usado está basado en un microscopio óptico con iluminación. En la mayoría de estos sistemas la luz de la fuente ilumina la regla. La intensidad de la luz reflejada es medida por un detector optoelectrónico, la detección es óptima si el trazo sobre la regla está en excelentes condiciones, pero para las reglas con calidad inferior en los trazos los resultados con estos arreglos son, en la mayoría de los casos, pobres. La mayoría de las reglas que han llegado para ser calibradas a CENAM caen dentro de este último grupo.

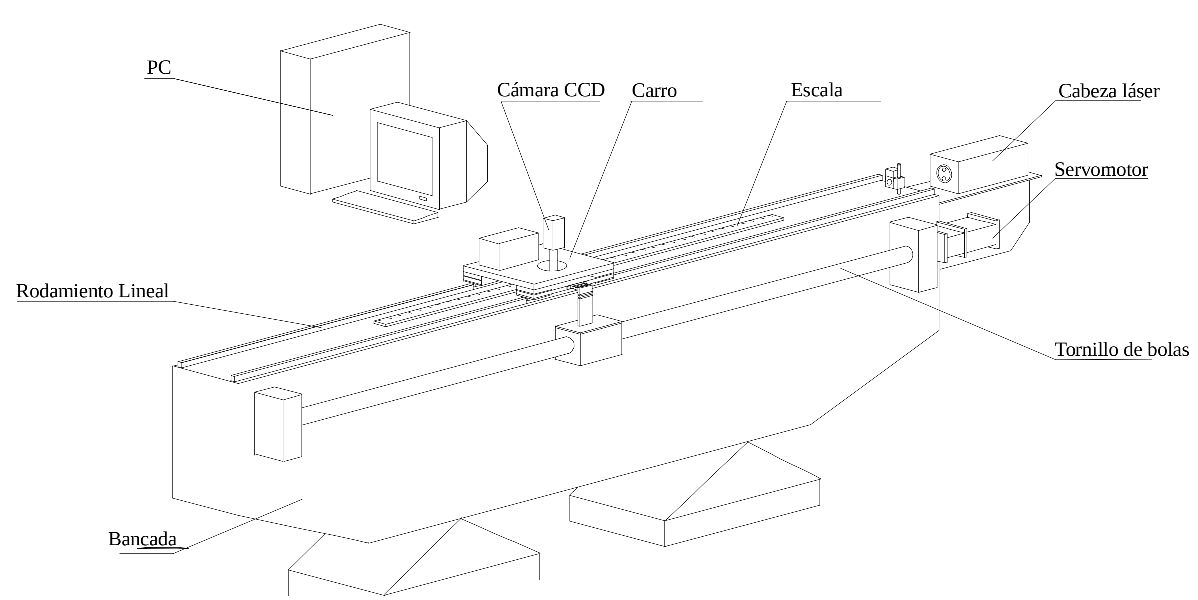


Fig. 1 *Estructura del sistema de calibración*

Los reportes de varios sistemas analizados que emplean la reflexión de la luz, reportan que la señal obtenida tiene un alto nivel de ruido, y por ello la detección de los bordes de los trazos es complicada. Por esta razón se decidió diseñar un sistema de detección de líneas basado en un modelo de procesamiento de imágenes, el cual pudiera proporcionar una respuesta adecuada para la mayoría de los tipos de trazos en las reglas al sistema global.

El sistema desarrollado por CENAM puede observarse en la figura 1. Aquí se muestran los diversos componentes del sistema, cabe señalar que un retrorreflector para el haz láser se encuentra debajo del carro, cercano al microscopio con la CCD con el fin de completar el camino óptico para lograr la medición por interferometría.

3.1. Sistema Mecánico

La bancada del sistema fue diseñada para que contara con rigidez, con el propósito de minimizar las deflexiones causadas por el movimiento del carro. La bancada esta hecha principalmente de acero estructural en una distribución tal que proporciona la rigidez deseada sin ser demasiado pesada, la parte superior de la misma (donde se coloca la regla para la calibración) fue maquinada y la planitud obtenida fue de alrededor de 35 μm.

Sobre esta superficie se instalaron dos guías lineales cuidadosamente alineadas a través de las cuales se mueve el carro a lo largo de la bancada. En un inicio, el carro iba fijo a cuatro pequeños carros, lo que provocó problemas durante el movimiento debido a las desviaciones de rectitud y paralelismo en las guías, así como a las perturbaciones por efectos térmicos, al tener un sistema mecánico sobrerestringido.

Para reducir esta desventaja se diseño un soporte cinemático con una configuración como la mostrada en la figura 2.

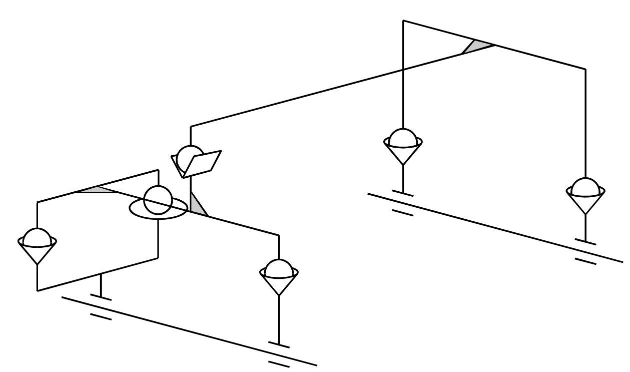


Fig. 2 *Conexión del carro con la bancada*

La configuración de la figura 2 reduce satisfactoriamente las contribuciones de distorsiones mecánicas y efectos térmicos permitiendo al carro moverse suavemente a lo largo de todo el recorrido de las guías con buena repetibilidad.

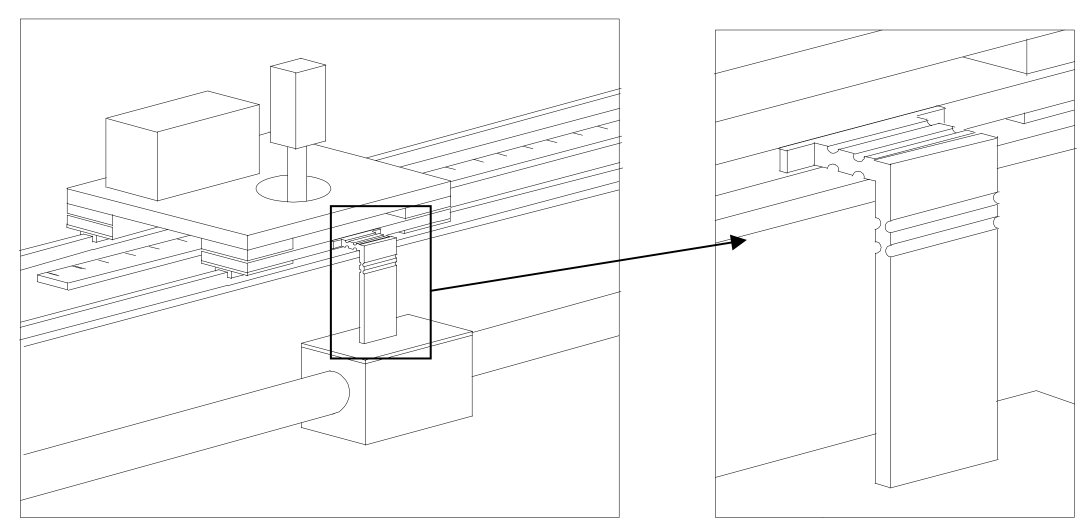


Fig. 3 *Sistema Flexure para transmisión de movimiento*

El soporte fue hecho usando bolas de acero endurecido y conos maquinados de acero M2 a 60HRC, el riel y el plano ambos con similares características. En una lado del carro hay dos conos los cuales solo tiene la libertad de moverse a lo largo del riel, el otro lado tienen un cono en un carro y un cono y un plano en el otro, lo cual evita la rotación y proporciona estabilidad, ambos lados están conectados por medio una bola sobre un riel, lo que reduce el efecto debido a falta de paralelismo de los rieles montados en la bancada.

El carro se mueve a lo largo de la bancada por medio de un tornillo de bolas, el cual es dirigido por un servomotor con un engrane reductor. Sin embargo el tornillo de bolas no es paralelo a los rieles de la bancada, y aun más hay una deflexión natural en el tornillo causada por su propio peso.

Dado que es necesario trasmitir el movimiento de la tuerca del tornillo hacia el carro solo en una dirección, y con el objeto de reducir las distorsiones del tornillo de bolas ocasionadas por su desalineamiento, fue necesario diseñar un acoplamiento que disminuyera estos errores. Lo anterior se logró usando un sistema de "flexure" como el mostrado en la figura 3.

La rigidez del "flexure" es lo suficientemente alta en la dirección del movimiento y provee una adecuada transmisión hacia el carro, pero en las direcciones perpendiculares al movimiento el sistema "flexure" puede ser deformado y es capaz de reducir la transmisión de distorsiones de movimiento hacia el carro.

Con el propósito de evaluar la rectitud del movimiento se usó la técnica de autocolimación, los resultados obtenidos son de 60 μm para cabeceo (pitch) y 32 μm de deriva (yaw), que representan valores aceptables para el sistema que se diseñó.

3.2. Estructura total del sistema

La figura 4 muestra un diagrama de bloques del sistema completo. El sistema esta controlado en su totalidad por una computadora, incluyendo el movimiento del carro. La exactitud de posicionamiento no es una variable crítica en el sistema gracias al robusto algoritmo de procesamiento de imágenes que se desarrolló para la detección del centro del trazo sobre la regla, por lo que la repetibilidad de 15 μm obtenida por el control es suficiente para el sistema.

3.3. Descripción del software

Como se había mencionado antes, cuando las reglas graduadas son calibradas, es esencial detectar la posición de los trazos sobre la regla. En este trabajó se utilizó un novedoso algoritmo que trabaja fuera de línea para determinar la distancia entre los trazos graduadas.

Para este propósito se uso un Sistema de Visión (SV) que consiste en un microcopio y una cámara CCD, la posición del SV con respecto al origen en la regla graduada es determinada con un interferómetro láser.

Fig. 4 *Diagrama a bloques del sistema*

El sistema de visión es desplazado sobre la regla, guardando las imágenes adquiridas por la CCD, la posición reportada por el interferómetro, y los sensores del sistema. Estas tareas del software son desarrolladas por un primer programa que controla la toma de datos del sistema y las posiciones sobre la regla que se desean calibrar, lo cual es establecido por el usuario en la interface del usuario del programa.

La segunda parte del software trabaja fuera de línea, esto es una vez concluida la toma de datos se procede a su análisis en un segundo programa.

Primero se determina de manera robusta la ecuación de la línea que mejor ajusta el centro del trazo de la regla que se observa en la imagen digitalizada. Para detectar el centro de la línea en cada renglón de la imagen con resolución subpixel, el algoritmo emplea un filtro complejo de Gabor, también conocido como filtro de cuadratura. Este filtro tiene la siguiente forma compleja:

$$h(x) = g(x)\left[\cos(\varpi_0 x) + j\sin(\varpi_0 x)\right] \qquad (1)$$

donde $g(x)$ es una gausiana con $\sigma = \varpi_0 / 4$ y ϖ_0 es la frecuencia de la señal cosenoidal similar al ancho en píxeles de un trazo sobre la imagen que se esta procesando. Un máximo en la magnitud del de la señal filtrada indica la presencia de un trazo en la imagen, con esta posición se busca dentro de la fase de la señal filtrada un cruce por cero de esta, tomando en cuenta una vecindad de píxeles (5 para nuestro caso) con los cuales se ajusta una línea cuyo cruce por cero indica la interpolación a nivel subpixel para el centro del trazo buscado.

El siguiente paso consiste en encontrar la ecuación de línea que mejor ajusta el trazo a lo largo de la imagen, para lo cual se hace uso de una estadística robusta. El algoritmo emplea un estimador-M cuya forma general se puede expresar de la forma:

$$U(m,b,a) = \sum_{i=1}^{n} \rho\left(\frac{y_i - mx_i - b}{\alpha}\right) \qquad (2)$$

donde ρ es una función del módulo de error, *m* y *b* son los parámetros de la línea buscada, en nuestro caso se eligió una cuadrática truncada cuya ecuación se puede representar por:

$$\rho(x) = \begin{cases} x^2 & |x| < a \\ k & \text{otro valor} \end{cases} \qquad (3)$$

Minimizando la función U el algoritmo obtiene los parámetros de la recta de mejor ajuste. Con las líneas detectadas, es necesario darles una posición con relación a la referencia para este proceso se emplea la ecuación:

$$z_j^w = z_i + \beta x_j \qquad (4)$$

donde. z_j^w representa la posición real de la línea j, en tanto que β es el factor de regla para cada píxel en la CCD. Para el cálculo de este factor, se emplean las lecturas del interferómetro y las posiciones para una misma línea en diferentes posiciones con respecto a la CCD, para su cálculo se resuelve el sistema de ecuaciones mostrado en la siguiente ecuación:

$$z_0 + \beta x_0 = z_1 + \beta x_1 = \cdots = z_n + \beta x_n = z^w \qquad (5)$$

con este factor y la coordenada sobre el sensor, se mapea el centro del trazo a coordenadas globales y de esta forma se obtiene la distancia hacia todas los trazos encontrados.

4. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

La incertidumbre de medición fue evaluada bajo los lineamientos de la GUM[10]. El modelo de medición propuesto esta expresado en la siguiente ecuación:

$$d = l_r \left[1 - \alpha \cdot (t_r - 20\,^\circ C)\right] - \left\{\left[\frac{m\lambda}{n} - \frac{l_{dp}}{n_i} + \frac{l_{dp}}{n_f}\right] + l_p f\right\}\left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right) - l_a \beta + l_d \frac{\tau^2}{2} \qquad (6)$$

La siguiente tabla muestra el significado de las variables incluidas en el modelo:

Nombre de la fuente	Símbolo
Longitud de la regla	l_r
Coeficiente de expansión térmica	α
Temperatura de la regla	t_r
Número de franjas	m
Longitud de onda	λ
Índice de refracción del aire	n
Longitud de Dead Path	l_{dp}
Índice de refracción del aire inicial	n_i
Índice de refracción del aire final	n_f
Ancho de trazo en píxeles	l_p
Factor de longitud del píxel	f
Ángulo entre la regla y el haz láser	θ
Distancia entre la regla y el haz láser	l_a
Ángulo de deriva (Yaw) del movimiento del carro a lo largo de la bancada	β
Distancia entre el retroreflector y la CCD	l_d
Ángulo de cabeceo (Pitch) del movimiento del carro a lo largo de la bancada	τ

El análisis de incertidumbre mostró que la influencia de la temperatura y el coeficiente de expansión térmica para reglas de 3 m son las más grandes contribuciones en el balance. Si se miden reglas de menor longitud, las incertidumbres debidas al índice de refracción del aire y al error de Abbe llegan a ser más importantes, aun cuando solo alcanzan el 10% aproximadamente. Este efecto puede ser reducido determinando con menor incertidumbre el coeficiente de expansión térmica.

La incertidumbre lograda para reglas de 3 m con buena calidad en los trazos es de alrededor de 6 μm, la incertidumbre se mejora para los casos de reglas de cristal donde la calidad de los trazos es excelente (si su uso ha sido adecuado) y el coeficiente de expansión térmica tiene una menor influencia.

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema automático para la calibración de reglas graduadas en el CENAM aplicando un nuevo modelo para la detección de los trazos sobre la regla usando un sistema de visión y mediciones interferométricas. El sistema de visión ha sido probado en otras aplicaciones de medición dada su exactitud y robustez en la detección del centro de los trazos obteniendo una repetibilidad mejor a 100nm.

El sistema mejora la incertidumbre proporcionada por le método inicial empleado en el CENAM para la calibración de reglas graduadas.

La siguiente etapa de este proyecto será la participación en una comparación con otros

laboratorios con instrumentos similares con el fin de validar los resultados reportados por el sistema.

6 REFERENCIAS

[1] Muñoz, A.; Medición Robusta de Líneas Graduadas Utilizando un Sistema de Visión; Tesis de Maestría, CIMAT, Guanajuato, Gto., Junio 2001
[2] Muñoz, J. A.; Rivera M.; Medición Robusta de Líneas Graduadas Utilizando un Sistema de Visión; 3er. Encuentro Internacional de Ciencias de la Computación ENC 01, Aguascalientes, Ags. México 15-19 septiembre 2001
[3] A. Lassila, E. Ikonen and K. Riski, Interferometer for calibration of graduated line scales with moving CCD camera as a line detector; APPLIED OPTICS, Vol. 33, No. 16, 1 June 1994, pp. 3600-3603
[4] Chao-Jung Chen, Sheng-Hua Lu, Huang-Chi Huang, and Ren-Huei Hsu; Automatic calibration of measuring tapes with friction driver and a image processor;
[5] H. Heister; Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeβinstrumente; Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München, 1988
[6] C. Galvan and A. Castillo, Determinación del índice de refracción del aire y su incertidumbre, Manual de Usuario, CENAM 1998
[7] Gasvik K. J.; Optical Metrology, John Wiley and Sons, 1987
[8] González C., Woods R. E., Tratamiento Digital de Imágenes, Addison-Wesley, 1996.
[9] Huber R. J., Robust Statistics, Wiley Series in Probability on Mathematical Statistics, 1981
[10] Guía para la Expresión de la Incertidumbre, ISO 1995.